

武汉地区地铁车站通风空调系统的节能控制研究

中铁第四勘察设计院集团有限公司 庄炜茜[☆]

摘要 结合地铁车站的负荷特征,介绍了目前地铁车站集中空调系统的现状并总结了存在的不足。利用智能模糊控制方法,从空调风系统、水系统、主机群控三方面对武汉地铁四号线集中空调系统进行了整体优化控制。通过经济性分析得出,采用智能模糊控制系统后,3年内可收回初投资。

关键词 地铁 空调系统 节能 智能模糊控制

Research on energy saving control of ventilation and air conditioning system of underground railway station in Wuhan region

By Zhuang Weiqian[★]

Abstract Considering the load characteristics, summarizes the current situation and deficiency in underground railway station air conditioning systems, and performs by using an intelligent fuzzy control method the optimization of integrative control from the aspects of air system, water system, and group control of refrigerating machines for Wuhan Line Forth underground railway stations. The economical analysis results show that the initial investment of the intelligent fuzzy control system can be recovered within three years.

Keywords underground railway, air conditioning system, energy saving, intelligent fuzzy control

① ★ China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, China



庄炜茜

主要设计项目

- 南京地铁奥体中心站
- 南京站房
- 张家界站房
- 广州南站
- 苏州站房
- 南京南站房

0 引言

据资料报道,我国建筑能耗在能源总消费量中所占的比例已从 20 世纪 70 年代末的 10% 上升到近年的 27.45%。随着城市化进程的加快和人民生活质量的改善,这一比例还将不断增加,预计到 2020 年,总的建筑能耗将增长到社会总能耗的 35%^[1]。因此,建筑节能已成为建筑可持续发展的重要课题^[2-4]。

地铁作为一个城市的标志性公共基础设施,人员活动密集,今后的二三十年是我国城市地铁发展的高峰期。地铁环境控制系统是整个地铁工程的重要组成部分^[5],不仅为人员提供必须的安全、卫生、舒适的环境条件,同时也为列车及设备的运行提供必要的环境条件。目前各城市建成的地铁工程,其能耗都相当惊人,其中地铁通风空调系统能耗占了相当大的比例。根据经验统计,如果采用屏蔽门制式,通风空调用电量约占整个系统的 1/3,如采用闭式系统,这一比例甚至达到了 50%。因此优化设计地铁环控系统,减少能源消耗,降低环控系统运行

①☆ 庄炜茜,男,1978 年 3 月生,大学,工程师
430063 湖北省武汉市武昌杨园和平大道 745 号中铁第四勘察设计院集团有限公司城建院暖通所
(027) 51155038
E-mail: e-zhuang@163.com
收稿日期:2010-03-17

费用,成为一个值得关注的重要课题。

新建武汉地铁四号线作为武汉市的重点投资项目,应在设计阶段考虑集中空调系统的节能问题,本文将从集中空调风系统、水系统和主机群控等方面介绍节能优化设计,并进行相应的经济性分析,以期达到提高设计质量与节约投资及运行成本的目的。

1 地铁集中空调系统的负荷特征及常规设计

1.1 负荷特征

地铁车站负荷主要包括设备负荷(照明、电梯、自动售票机等设备的散热量)、列车和人员负荷、新风负荷。其中车站设备负荷在地铁运行期间相对稳定,基本是一个定值。站内负荷的变化主要是由乘客数量变化和屏蔽门开启引起的,屏蔽门开启的频率与行车对数有关,而行车计划根据客流量的变化来制定,因此站内负荷变化与客流变化存在近似正比关系,车站夏季日负荷曲线如图 1 所示。

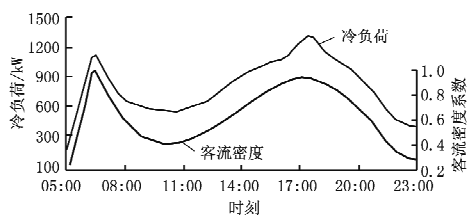


图 1 车站夏季日负荷曲线

由图 1 可以看出,日负荷与客流量明显相关,全日波动很大,最大负荷出现在 18:00,约是最小负荷的 6 倍,比全日平均负荷高出 50% 左右。对应于早晚两个客流高峰,日负荷有两个明显的峰值。晚高峰时一般外界气温较高,因此虽然客流量略低于早高峰,但负荷却高于早高峰。

1.2 系统的常规设计

由于地铁工程建设的特殊性,目前车站集中空调设备均是一次性投资到位,其容量对应的负荷值均为远期晚高峰时的空调负荷值。但在初期和近期运营阶段,由于客流量远远没有达到远期的预测值,负荷相对较小,但空调设备依然按照远期的目标值运行,造成能源的巨大浪费。

早期建成的地铁,采用人工控制的方法来增加或减少投入运行的主机数量和水泵台数,以达到节能的目的,该方式分级调节粗糙、实时性差,且受设备配置和人为因素影响较大。近期建设中的地铁,已配置了比较健全的 BAS 控制系统,利用 DDC 或

PLC 控制器控制空调系统的运行。这一方法原理简单、使用方便、投资成本低、具有一定的节能效果,但它有较大的局限性,节能效果有限。其缺点主要表现在:PI 或 PID 调节器最重要的工程参数 K_P (比例系数)、 T_I (积分时间常数) 和 T_d (微分时间常数) 不能跟随受控参量的变化进行自动调整,且 PID 调节多用于单参量(温度或压力)的简单控制。由于集中空调系统复杂,具有多参量、非线性、时变性且参量间耦合性强的特点,采用 PID 调节控制时很容易引起集中空调系统振荡,使控制温度在较大范围内波动,长时间都不能达到设定值的稳定状态,既影响了系统的稳定性,又降低了空调效果的舒适性。

2 地铁集中空调系统创新设计

武汉地铁四号线设计中,在原有地铁控制模式和经验基础上,结合其自身负荷特点,对控制模式和方法作了部分优化,以期达到提高设计质量与节约投资及运行成本的目的。

2.1 风系统变频控制

目前,我国几乎所有已建成的地铁车站,站台、站厅的公共区空调系统均采用定风量全空气系统。由于地铁的空调负荷较大,其能耗占地铁总能耗比例相当大,而风机能耗占空调系统总能耗比例又达到 40% 左右。因此,风机的节能运行对降低环控系统能耗非常重要。

传统的地铁空调系统中,无论是否为空调季节,送、回风机均定频全开,仅根据室外气候情况调节排风阀和混风阀,以实现全新风空调运行和最小新风运行模式的转换。由于风机容量按照远期条件设计,一般在 15~20 a 以后才能达到设计值,在地铁运行初期和近期,客流较少,同时隧道洞体温度较低,实际负荷远远低于设计负荷,需要的风量也远远低于设计风量,风机容量富余的情况比较明显,会造成巨大的能源浪费。

根据地铁车站负荷特点,采用变风量空调系统具有很大的节能潜力。变风量系统由于利用变频器调节风机转速,可实现风量的连续调节,能耗下降明显,而且能够更好地适应车站负荷的变化,有利于控制站内热环境状态。目前,民用空调工程中变风量空调系统成功应用的案例越来越多,并形成了各种控制策略,如定静压控制、变静压控制和总风量控制等方法;但是由于地铁工程的特殊性,其

使用时间、风系统布置方式、负荷特性都不同于一般的民用工程,上述三种传统的控制方法都不适合地铁工程,目前国内大多数城市的地铁工程基本采用定风量空调系统。

武汉地铁四号线设计中采用了焓值判断法以实现风机变风量运行模式,在车站公共区设置温湿度测点,根据测量值计算室内空气比焓,与设计的目标比焓进行比较,当低于目标比焓时,可将风机频率降低 0.5 Hz。为避免风机变频过于频繁,每 0.5 h 采集一次参数,经计算分析确定风机的工况。风量的减小将会使风机能耗大幅下降。同时,又由于车站空调系统还必须满足 5h^{-1} 换气的要求,所以变频调节的风量不能无限下降。根据经验,车站按照 5h^{-1} 换气计算所得到的风量约占远期空调总送风量的 70%,当风机变频的下限值为满足 5h^{-1} 换气要求的风量时,风机能耗占原能耗的 35%。

此外,车站设备管理用房的空调通风系统容量较小,并且该部分负荷组成主要为设备和照明负荷,相对稳定,采用变频调速的意义不大;隧道通风系统平时不运行,火灾排烟时全速运转,因此节能潜力较小,也可以不采用变频。

2.2 水系统智能模糊控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制,较适合于集中空调这样复杂的、非线性和时变性系统的控制。基于模糊控制的变频调速可以实现集中空调水系统真正意义上的变温差、变压差、变流量运行,使控制系统具有高度的跟随性和应变能力,可根据对被控动态过程特征的识别,自适应地调整运行参数,以获得最佳的控制效果。

2.2.1 水泵变频调速控制

传统的压差控制方式中,空调冷水流量、冷却水流量都是恒定的,其工作原理如图 2 所示。在系统供回水总管上安装压力传感器,根据末端负荷的变化控制两通阀和旁通阀的开度。这种控制方式优点是系统简单,不需要复杂的自控设备,缺点是不能根据负荷变化调整系统出力,只是通过调节阀增加系统的阻力,消耗水泵提供的多余压头,以达到减小流量的目的,造成了能源的巨大浪费。

根据地铁车站空调系统特点,空调系统大部分时间都在低于设计负荷的工况下运行,且负荷随客流量不断变化。为了节约运行费用,可以根据系统

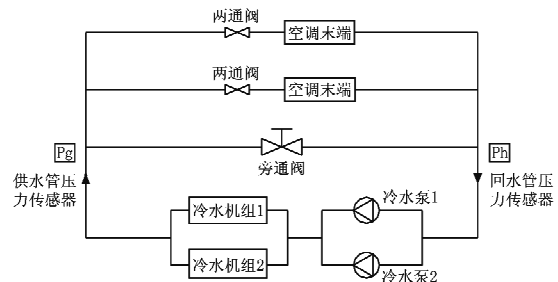


图 2 传统的压差控制法

实际所需流量调节水泵转速,实现水泵的变频调速。水泵的变频调速技术在一般空调变水量系统中已有成功的应用,目前,也有部分新建成的地铁已经采用了该技术,但其控制策略存在一定问题。部分工程将压差测点还是设置在供回水总管上,实际上是沿用了原来一次泵系统中恒定供回水压差流量旁通控制的做法,不能达到最佳的水泵节能效果。

基于以上原因,武汉地铁四号线设计中采用智能模糊控制理论全面优化地铁集中空调水系统,实施了变频调速控制。采用模糊预测算法对冷水和冷却水系统进行变频调速控制的流程图如图 3 和图 4 所示。

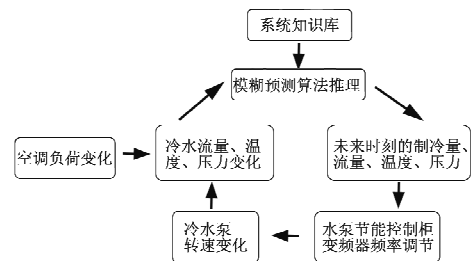


图 3 冷水系统控制流程图

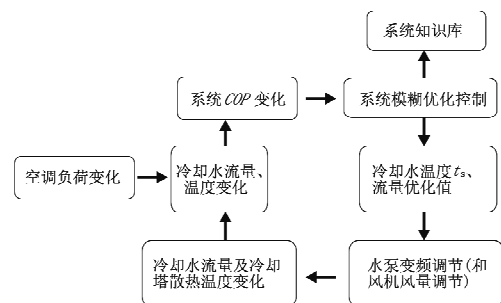


图 4 冷却水系统控制流程图

对于冷水系统,模糊控制器依据所采集的系统温度、压力、流量等实时数据及系统的历史运行数据,实时预测、计算出末端空调负荷所需的制冷量,以及各路冷水供回水温度、温差、压差和流量的最

佳值,并对冷水泵的转速进行相应的变频控制,使其在模糊控制器给出的最优值工况下运行;对于冷却水系统,模糊控制器在动态预测控制制冷剂循环的前提下,依据所采集的空调系统实时数据及系统的历史运行数据,计算出冷却水最佳进、出口温度,并与检测到的实际温度进行比较,根据其偏差值,动态调节冷却水的流量(和冷却塔风量),使系统转换效率逼近不同负荷状态下的最佳值,从而减小空调系统输送能耗。

2.2.2 主机群控策略

目前,国内地铁工程的车站空调系统一般都是设计成主机侧定流量、末端侧变流量,这种设计思路仅考虑了负荷侧的流量变化,未能有效地调整系统

流量以适应负荷的变化,因此不能真正实现节能。主机群控的最优解决方案应该是能即时预测下一时段负荷,并能根据负荷变化调整主机出力,而不仅仅是简单地通过主机启停来达到节能的目的。

由于地铁集中空调系统是一个多变量的、复杂的、时变的系统,其过程要素之间存在着严重的非线性、大滞后及强耦合关系,不同的地铁工程具有不同的主机群控启停控制点,而不同的控制策略对运行成本有直接影响。对这样的系统,无论用经典的 PID 控制,还是现代控制理论的各种算法,都很难实现较好的控制效果。只有采用模糊控制理论方法才能解决这一难题。表 1 将智能模糊控制与 DDC 控制器所采用的 PID 控制进行了比较。

表 1 智能模糊控制与传统 PID 恒压差或恒温差控制系统的比较

	恒压差控制	恒温差控制	智能模糊控制
采用技术	PID + 变频调速控制	PID + 变频调速控制	计算机智能控制 + 变频调速控制
控制参数	单参量(压差)	单参量(温差)	多参量(温度、流量、压力、负荷)
算法	PID 运算	PID 运算	自适应模糊运算
结构	简单	简单	复杂
保护	压力下限	温度下限	温度下限、压力下限、流量下限
节能	水系统 30%	水系统 30%~50%	水系统 60%~80%, 主机 10%~30%
关注对象	风机、水泵单机	风机、水泵单机	系统整体节能
造价	较高	较高	高

由表 1 可知,智能模糊控制与 DDC 控制器所采用的 PID 控制相比,其先进性不容置疑。模糊控制理论更关心系统整体能耗的高低。通过预判当前负荷,寻找最佳的系统运行点,实现系统运行与负荷变化的动态跟随,使整体的 COP 值最高。它是集中空调的适宜控制方式,也是目前较佳的控制方式。

主机群控的最优解决方案是通过采用智能模糊控制监测冷水及冷却水进出水温度、蒸发温度、冷凝温度、油温、油压、压缩机电动机状态等,即时预测下一时段负荷,并根据负荷变化优化主机启停,调整主机出力,实施水泵变频调速,实现远程控制主机、水泵等设备,使得空调的控制系统达到最优,确保合理的控制设备工况,而不仅仅是简单地通过主机启停来达到节能的目的。

智能模糊控制系统突破了传统集中空调节冷剂系统的运行方式(定流量模式或冷源侧定流量而负荷侧变流量模式),实现最佳输出能量控制,即空调主机制冷剂流量自动跟随末端负荷需求而同步变化(即变流量),因此,在空调系统的任何负荷工况下,都能既保持集中空调系统所服务房间的舒适性,又实现最大程度的节能。系统全面采集集中空调的各种运行参量,利用先进的模糊控制技术对这

些相互关联、相互影响的运行参量进行动态优化控制,使空调主机始终运行在最佳工况,从而可减少主机 10%~30% 的能耗。

2.3 空调风、水系统控制的优先级选择

当外界负荷变化时,室内温、湿度会在一段时间内发生波动。根据《暖通空调设计规范专题说明选编》^[6],末端盘管“流量-负荷”的关系中,当末端盘管的流量减少到设计值的 60% 时,传热能力仍可达到 80%~90%,盘管传热能力对流量改变不敏感的原因主要是盘管传热系数的改变主要取决于空气侧的传热系数的变化,而水侧因流量变化而引起的传热系数变化,对总的传热系数影响不大。

所以,当外界负荷发生变化时,应优先改变风系统的工况,以适应外界负荷的变化,当风系统的变化达到极小值时,方考虑水系统的变频调速控制。

3 集中空调系统的投资收益分析

3.1 运行费用分析

将空调使用时间折合到满负荷峰值当量时间进行比较。根据美国 ARI 标准和中国行业标准 JB/T 4329—97^[7],集中空调系统通常 10% 的时间,负荷在 90% 以上;30% 的时间,负荷在 60% 以上;60% 的时间,负荷在 40%。空调使用季节系数

计算结果为 0.51, 考虑到地铁负荷的特殊性, 笔者在作投资分析时, 空调季节系数采用 0.6。一般综合电价按 0.67 元/(kWh) 考虑。

空调运行时间按 120 d 计算, 主机当量满负荷运行时间为 1 296 h, 水泵等配套设施的运行系数按照 0.7 估算, 当量满负荷运行时间为 1 512 h。

通常一个车站的大系统通风设备配电容量约为 200 kW 左右, 风机按全天满负荷计算, 运行时间为 2 160 h。

典型车站空调系统按照传统控制模式运行, 运行费用估算如表 2 所示。

表 2 典型车站空调系统传统控制模式运行费用估算

	用电量/kW	台数	总用电量/kW	当量负荷运行时间/h	电价/(元/(kWh))	电费/万元
冷水机组	110	2	220	1 296	0.67	19.1
冷水泵	30	2	60	1 512	0.67	6
冷却水泵	37	2	74	1 512	0.67	7.5
冷却塔	5.5	2	11	1 512	0.67	1.1
风机			200	2 160	0.67	28.9
合计						62.6

3.2 采用节能控制后的初投资增加额

由于智能模糊控制系统与传统控制系统的硬件区别仅仅在于智能控制柜上, 主机、末端等其他空调设备投资是一样的, 在采用传统控制模式时, 其他设备还必须配有普通控制柜, 方能纳入 BA 控制系统。故在此仅估算出一次性投资的增加额。冷水机组、冷水泵、冷却水泵、冷却塔的总用电功率为 365 kW。按照装机功率, 模糊控制柜的单位造价增加额约为 700 元/kW。水系统一次性投资增加为: $365 \text{ kW} \times 0.07 \text{ 万元/kW} = 25.55 \text{ 万元}$ 。由于风系统变频控制仅仅是控制策略的优化, 在一般配电柜的基础上增加变频器, 变频器的价格约为 1 000 元/kW。风系统一次性投资增加: $200 \text{ kW} \times 0.1 \text{ 万元/kW} = 20 \text{ 万元}$, 总的初投资共增加: $25.55 \text{ 万元} + 20 \text{ 万元} = 45.55 \text{ 万元}$, 项目投资回收期为: $45.55 \text{ 万} \div 16 \text{ 万元/a} = 2.85 \text{ a}$, 系统寿命周期总节能金额为: $16 \text{ 万元/a} \times 15 \text{ a} = 240 \text{ 万元}$, 项目投资净收益为: $240 \text{ 万元} - 45.55 \text{ 万元} = 194.45 \text{ 万元}$, 项目投资净收益率为: $194.45 \text{ 万元} \div 45.55 \text{ 万元} \times 100\% = 427\%$ 。

3.3 节煤分析

按照中国政府与世界银行和全球环境基金 (GEF) 规定的统一的折标准煤系数 0.399 t/(MWh) 计算, 每节约 1 kWh 电相当于节约煤 0.399 kg。则节煤情况为:

$$0.399 \text{ kg/(kWh)} \times 936.3 \text{ kWh} \times 25\% \times 10^3 = 7.935 \times 10^4 \text{ kg} = 79.35 \text{ t}.$$

3.4 减排分析

按照我国现行的燃煤排放系数, 每 kWh 发电量的 CO₂ 排放量 900 g、SO₂ 排放量 11 g, 则减排

情况如下:

$$\text{CO}_2: 0.9 \text{ kg/(kWh)} \times 936.3 \text{ kWh} \times 25\% \times 10^3 = 2.11 \times 10^5 \text{ kg} = 211 \text{ t};$$

$$\text{SO}_2: 0.011 \text{ kg/(kWh)} \times 936.3 \text{ kWh} \times 25\% \times 10^3 = 2.57 \times 10^3 \text{ kg} = 2.57 \text{ t}.$$

4 结语

由于目前集中空调系统按照远期高峰时的空调负荷值进行设计, 采用 BAS 控制系统进行单参量调节, 因此存在一些不足之处。本文结合地铁的负荷特征, 对武汉地铁四号线集中空调系统进行了创新设计, 通过采用智能模糊控制系统进行风机变频、水泵变频以及主机群控, 实现了节能优化设计, 极大地降低了系统能耗。考虑集中空调智能模糊控制系统的初投资, 典型地铁车站采用智能模糊控制系统后, 3 年内可完全收回初投资。

参考文献:

- [1] Yang L, Lam J C, Liu J P, et al. Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates [J]. Energy Conservation and Management, 2008, 49(1): 113-124
- [2] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40
- [3] 郎四维. 我国建筑节能设计标准编制思路与进展[J]. 暖通空调, 2004, 34(5): 30-36
- [4] Lam J C, Wan K K W, Tsang C L, et al. Building energy efficiency in different climates [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(8): 2354-2366
- [5] 马光友. 广州地铁环控系统技术经济性综述 [J]. 暖通空调, 2003, 33(2): 65-68
- [6] 暖通规范管理组. 暖通空调设计规范专题说明选编 [M]. 北京: 中国计划出版社, 1990
- [7] 合肥通用机械研究所. JB/T 429-97 容积式冷水 (热泵) 机组 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997